

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra energetických zařízení**



**Tomáš BUĎÁREK**

**Využití kavitace pro zpevňování povrchů**

**( Utilization cavitation for surface layers hardening)**

Vedoucí diplomové práce:                      Ing. Miloš Müller, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:                      Ing. Patrik Zima, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet stran:                      39

Počet obrázků:                      18

Počet tabulek:                      5

Počet příloh:                      14

Liberec 2011

## **ANOTACE:**

Tato bakalářská práce je zaměřena na využití ultrazvukové kavitace pro nekonvenční zpevnění povrchových vrstev. Cílem této práce je navrhnout experimentální zařízení využívající metody zpevňování pomocí kavitace. Teoretická část pojednává o kavitačním jevu, nepříznivých vlivech kavitace a možném využití kavitace. Detailně jsou popsány principy a konstrukce zařízení vytvářející kavitační pole. Zvláště je kladen důraz na ultrazvukové měniče založené na piezoelektrickém jevu. Také je popsán účinek kavitace na zpevnění povrchu. Dále je popsána metodika zkoušení a metodika vyhodnocení účinků kavitace. Zkoušky zpevňování jsou provedeny na vybraných materiálech.

Praktická část obsahuje popis experimentu, popis měření a vyhodnocení výsledků.

**Klíčová slova:** kavitace, kavitační pole, piezoelektrický jev, plastická deformace

## **ANNOTATION**

This bachelor thesis is focused on the utilization of ultrasonic cavitation for an unconventional hardening of surface layers. The aim of this work is to design an experimental setup utilizing the method of the hardening due to cavitation. The theoretical part discusses the theory of cavitation phenomena, undesirable effects of cavitation and possible use of cavitation. The principles and designs of devices producing cavitation fields are described in detail. Special focus is placed on ultrasonic transducers based on the piezoelectric effect. The hardening effect of cavitation is discussed. The methodology for the testing and the evaluation of hardening due to cavitation are described. Tests of the surface layer hardening are performed for selected materials.

The practical part includes a description of the the experiment, a description of the measurement and evaluation results.

**Key words:** cavitation, cavitation field, piezoelectric effect, plastic deformation

## **PROHLÁŠENÍ**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/200 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **DECLARATION**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/200 Coll. Applies to my thesis in full in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na úvod bych rád poděkoval všem, kdo se podíleli na vzniku této bakalářské práce. Největší poděkování patří panu Ing. Milošovi Müllerovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a cenné rady. Nesmím ovšem zapomenout ani na paní Vlastu Čílovou a pana Ing. Václava Klímu, kteří mi velice pomohli při měřeních v laboratořích.

# OBSAH

PROHLÁŠENÍ .....	5
DECLARATION .....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH .....	7
Seznam použitých symbolů a zkratk .....	9
<b>1 Úvod.....</b>	<b>10</b>
1.1 Kavitace .....	10
1.1.1 Definice .....	10
1.1.2 Třídění kavitace .....	10
1.1.3 Nepříznivé účinky kavitace .....	11
1.1.4 Využití kavitace.....	12
1.1.5 Časový průběh kavitační eroze .....	13
1.2 Definice ultrazvuku .....	13
<b>2 Cíl práce .....</b>	<b>14</b>
<b>3 Rešerše.....</b>	<b>15</b>
3.1 Způsoby generování kavitačních zón .....	15
3.1.1 Hydrodynamické systémy .....	15
3.1.2 Magnetostrikční systémy generující kavitaci .....	16
• Magnetostrikce .....	16
• Provedení magnetostrikčních měničů.....	16
3.1.3 Piezoelektrické systémy generující kavitaci .....	17
• Piezoelektrický jev .....	17
• Příklady provedení piezoelektrických měničů .....	17
3.1.4 Akustické transformátory .....	21
3.2 Současné způsoby zpevňování povrchů .....	23

3.3	Současný stav zpevňování povrchových vrstev pomocí kavitace .....	23
3.4	Test kavitační odolnosti materiálů (Cavitation Erosion Test) .....	24
3.5	ICET databáze .....	24
3.5.1	Prováděné testy .....	25
3.5.2	Cíl .....	25
3.5.3	Obsah .....	26
<b>4</b>	<b>Popis zařízení .....</b>	<b>27</b>
4.1	Ultrazvukový generátor .....	27
4.2	Elektromechanický měnič .....	28
4.2.1	Konstrukce elektromechanického měniče .....	28
4.3	Akustický zesilovač .....	29
4.4	Nádoba, vzorek .....	29
4.5	Vibrometr .....	30
4.6	5 slotový PXI box .....	31
<b>5</b>	<b>Měření .....</b>	<b>32</b>
5.1	Působení kavitačního pole na vzorek .....	32
5.2	Měření amplitud kmitů sonotrody pomocí vibrometru .....	32
5.3	Analýza vzorků pomocí digitálního mikroskopu .....	33
5.4	Měření mikrotvrdosti .....	34
<b>6</b>	<b>Zhodnocení práce a závěr .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>40</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

ICET	International Cavitation Erosion Test	
IGFET	Insulated – Gate Field – Effect Transistor	
AFC	Automatic Frequency Control	
PXI	PCI eXtensions for Instrumentations	
$v$	rychlost koncového bodu vlnovodu	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$
$u$	okamžitá akustická výchylka	$[\text{mm}]$
$t$	čas	$[\text{s}]$
$A$	amplituda výchylky	$[\text{mm}]$
$\omega$	úhlová frekvence	$[\text{s}^{-1}]$
$x$	souřadnice šíření akustického vlnění	$[\text{mm}]$
$c$	rychlost šíření akustického vlnění v daném prostředí	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$
$f_m$	frekvence měniče	$[\text{kHz}]$
$f_{sp}$	frekvence střídavého proudu	$[\text{kHz}]$
$D_0$	větší průměr stupňovitého vlnovodu	$[\text{mm}]$
$D_1$	menší průměr stupňovitého vlnovodu	$[\text{mm}]$
$\sigma$	mechanické napětí	$[\text{MPa}]$
$f$	vlastní frekvence měniče	$[\text{kHz}]$

# 1 Úvod

## 1.1 Kavitace

Kavitace je unikátní jev, se kterým se můžeme setkat v mnoha oborech lidské činnosti. Kavítace se může objevit v jakémkoliv hydraulickém zařízení. Kavítace nevzniká pouze ve vodě, ale v jakékoliv kapalině. Přítomnost kavítace způsobuje mnoho problémů při konstrukci čerpadel a turbín. Kavítaci lze také pozorovat v přírodě například v tekoucí vodě. Proti nepříznivým vlivům kavítace stojí velký potenciál možnosti využití kavítace k různým účelům [1].

### 1.1.1 Definice

Slovo kavítace pochází z latinského slova *cavea*, které znamená dutý prostor. Kavítace může být obecně definovaná jako soubor jevů spojených se vznikem, výskytem, aktivitami a zánikem makroskopických dutiny tekutině. Tyto dutiny mohou být prázdné, vyplněné plynem nebo parami nebo jejich směsí. Samostatné dutinky se pak nazývají *bubliny* [1].

Vznik bublin zahrnuje dvě fáze – nukleace a růst. *Nukleace* je proces kterým vzniká jádro (nejmenší mikroskopická oblast nové fáze, jenž je schopná spontánního růstu) nové fáze v dříve homogenní kapalině nebo pevné látce. Za určitých podmínek mohou bublinky narůst do makroskopické velikosti. A tento děj se nazývá *růst bubliny*. Následný vývoj bubliny například její oscilace, kolaps, interakce s prostředím nebo dalšími bublinami, tvarová deformace a vznik kavitačních struktur se nazývá *aktivita bublin* [1].

### 1.1.2 Třídění kavítace

Z hlediska převládajícího obsahu bublinky můžeme kavítaci rozdělit na parní a plynovou. Bublina může obsahovat plyn nebo páru nebo směs obojího. Pokud bublina obsahuje plyn, snižování okolního tlaku za téměř konstantní teploty způsobuje explosivní vypařování dovnitř bublinky. Tento děj se nazývá *parní kavítace* a dochází k němu po překonání pevnosti v tahu kapaliny. Naopak vypařování iniciované přehřátím kapaliny za téměř konstantního tlaku je nazýváno varem. Parní kavítace je podobná varu, ale řídicím mechanismem není změna teploty nýbrž změna tlaku. V praxi bublina vždy obsahuje směs plynu a páry, kdy jedna ze složek převažuje.[1].



Dále se kavitace rozděluje podle způsobu generace bublin. Takto můžeme rozlišovat čtyři, níže uvedené způsoby.

*Hydrodynamická kavitace* – se vyskytuje v proudící kapalině v oblastech nízkého tlaku například při zrychlení proudu kapaliny uvnitř čerpadel nebo okolo překážek jakými jsou rychle se otáčející listy lodního šroubu. Tlak kapaliny klesá v důsledku zvýšení rychlosti. Když tlak klesne pod tlak sytých par kapaliny, dochází ke vzniku bublin [1].

*Akustická kavitace* – vzniká v neproudících systémech, kde se změna tlaku vybudí použitím silného akustického pole. Vysoce intenzivní akustické pole vede k roztržení kapaliny a ke vzniku dutin nebo bublin. Když tlakové amplitudy dosáhnou záporných hodnot, zrychlí se růst bublin [1].

*Optická kavitace (laserem indukovaná kavitace)* – je produkována fotony vysoce intenzivního světla generovaným lasery koncentrovaným do kapaliny. Silný laserový impulz způsobuje parní kavitaci [1].

*Částicová kavitace* – je produkována elementární částicí např. protonem. Je založena na růstu bublin v přehřáté kapalině. Když je nabitá částice vyslána do kapaliny vytváří za sebou ionizační dráhu. Kapalina okolo dráhy se vypařuje za vzniku mikroskopických bublin, které rostou do makroskopických velikostí [1].

Tyto čtyři typy kavitace mohou být rozděleny do dalších dvou velkých skupin. První z nich je *tenzní kavitace*, která vzniká díky poklesu tlaku. Tato skupina zahrnuje hydrodynamickou kavitaci a akustickou kavitaci. Do druhé skupiny patří optická kavitace a částicová kavitace. Tato skupina se nazývá *kavitace v důsledku dodání energie* [1].

### 1.1.3 Nepříznivé účinky kavitace

Přítomnost kavitace může způsobit snížení účinnosti turbín, zvýšení odporu ovlivněných součástí stroje a vznik dodatečných sil na povrchu pevných těles. Bublínky vzniklé v brzděném systému automobilu mohou změnit hustotu pracovní kapaliny v nevhodném okamžiku a tím způsobit nehodu. Konečně hluk a vibrace jsou doprovodnými jevy kavitace. Kavitace se také objevuje v lidském těle, živých organismech a rostlinách [1].

Nežádoucí jevy související s kavitací jsou většinou způsobeny tepelnými a mechanickými účinky doprovázející kolaps bubliny. Jedním z nejznámějších je kavitační

eroze. Představuje mechanickou degradaci pevných materiálů. Tyto účinky poškozují lopatky lodních šroubů, vodních turbín, čerpací zařízení a potrubní systémy. Kavitační eroze je zapříčiněna dvěma účinky doprovázející kolaps bubliny. Prvním z nich je vznik rychlého proudu tekutiny proti pevné stěně (viz. *Příloha č. 1*) a druhým je produkce akustické energie ve formě rázových vln [1].

Tepelné účinky se objeví během imploze bubliny, když je plyn uvnitř bubliny velmi stlačen. Teplota v takto kolabující bublině je v rozmezí od 4000K až do 9000K, což odpovídá teplotě plazmy. Vzhledem k tomu, že ke kompresi dochází na velmi krátkých okamžicích, je jen malý zlomek tepla převeden do okolní kapaliny a tím i pevné stěny [1].

#### **1.1.4 Využití kavitace**

Negativní účinky kavitace jsou často zdůrazňovány, ačkoliv je možno využít jí v mnoha průmyslových procesech. Pro její schopnost koncentrovat velké množství energie na malé ploše a produkovat velké tlaky, je kavitace využívána pro čištění povrchů ultrazvukovou energií. Protože ultrazvuk prochází skrz kovy a mnoha dalšími materiály, ultrazvuková energie proniká do slepých děr a složitých tvarů, které nemohou být dosaženy jinou metodou [1].

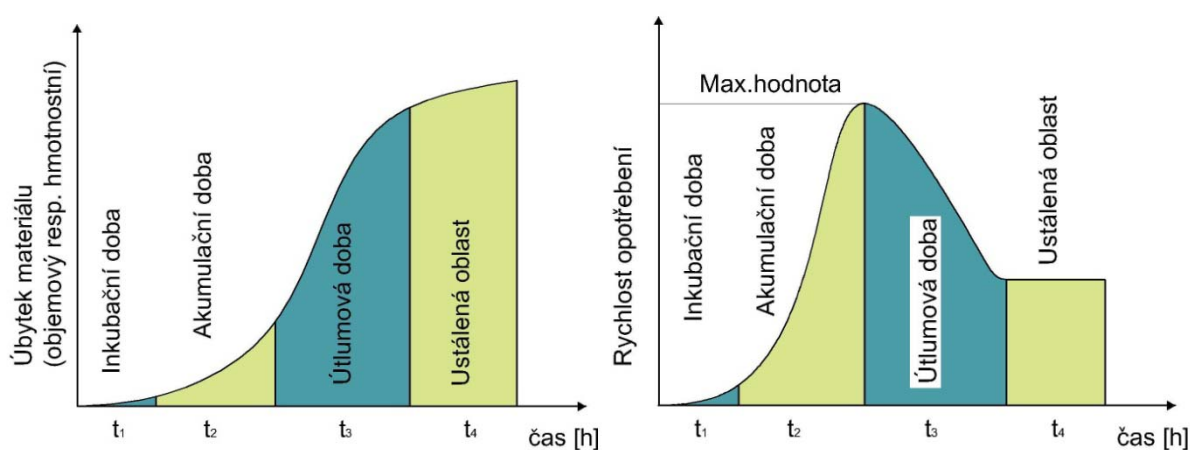
Důležitým uplatněním kavitace je čištění odpadních vod. Akustickým ozařováním znečištěné vody se generují kavitační bubliny, které odstraní plynné znečišťující látky a váží na sebe pevné znečištění. Volné radikály, které se vytvářejí během silných kolapsů bublin, neutralizují chemické znečištění látky. Smykové toky, rázové vlny, erozivní mechanismy a dodatečný chemický dopad volných radikálů zničí živé organismy [1].

Extrémním případem kavitace je *superkavitace*. Jedná se o hydrodynamický proces, kdy těleso ponořené do kapaliny je zcela obaleno bublinou generovanou pomocí kavitátoru umístěného v přední části tělesa. Superkavitující tělesa dosahují pod vodou velkých rychlostí a to díky velkému snížení tření [1].

Laserem indukovaná kavitace a její doprovodné jevy jsou také široce využívány v medicíně. K rozbíjení močových kamenů a trombů. Kavitační bubliny jsou řídicí silou při řezání tkáně pulzním laserem používané v nitrooční chirurgii [1].

### 1.1.5 Časový průběh kavitační eroze

Časový průběh opotřebení se rozděluje do čtyř fází, tak jak je to zobrazeno na Obr. 1. První. fází je inkubace (náběhová doba). V této fázi ještě nedochází k měřitelnému úbytku materiálu. Již se začínají objevovat první mikroskopické trhliny. Zároveň dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy. Jedním z cílů této práce je nalezení hranice mezi inkubační dobou a další fází, která se nazývá akumulací fáze. V této fázi dochází k výraznému nárůstu rychlosti opotřebení materiálu a k postupnému rozšiřování poškození z lokálních na celou napadenou oblast. Třetí oblastí útlumová oblast, ve které díky zvětšování hloubky poškození se rychlost opotřebení materiálu po dosažení maximální rychlosti postupně snižuje. Poslední čtvrtá fáze ustálení se vyznačuje konstantním opotřebením materiálu [15].



Obr. 1 Časový průběh kavitační eroze [15]

## 1.2 Definice ultrazvuku

V každém pružném prostředí jakým může být plyn, kapalina a pevné látky, může vznikat mechanické vlnění. Mechanické vlnění je děj, při kterém dochází k přenosu mechanických kmitů tímto prostředím. Šíření vln je způsobeno přenášením kmitů z jednoho bodu na další mechanickými vazbami. Během vlnění nedochází k přenosu hmoty nýbrž k přenosu energie. Zvuk je podélné mechanické vlnění. Člověk vnímá toto vlnění v rozsahu přibližně v rozsahu 16 Hz až 20 kHz. Lidské ucho je nejcitlivější na frekvenci okolo 3kHz. Vlnění pod uvedenou hranici 16 Hz se nazývá infrazvuk a nad 20 kHz se nazývá ultrazvuk. Z tohoto je jasné, že ultrazvuk se liší od normálního zvuku pouze frekvencí. Mají tedy stejnou fyzikální podstatu, ale jiné účinky. To je způsobeno tím, že vlnění o vyšších frekvencích lze vytvořit o daleko větší intenzitě. [1], [7], [13].

## 2 Cíl práce

Cílem té to práce je vyhledat a zpracovat informace o současném stavu metod zpevňování povrchů. A to jak metod konvenčních, dnes běžně používaných, tak především metod poměrně nových, v průmyslu nepoužívaných. Konvenčními metodami jsou např. kuličkování, nebo metody tepelně-chemického zpracování. Metodami novými, oproti konvenčním neprozkoumány, jsou míněny možnosti využití kavitace pro nedestruktivní zpevnění povrchových vrstev. Pro rozbor jsou použity odborné články popisující vliv kavitačního pole na pevný povrch těles. V teoretické části jsou zároveň popsány způsoby generování kavitačních zón. V dalším kroku studie je sestaveno základní schéma experimentu pro výzkum zpevňování pomocí kavitace generované ultrazvukem. Schéma popisuje reálnou sestavu, jež je využívána v univerzitní laboratoři. Dále je pak vybrán vhodný materiál, podle již provedených experimentů a jejich zveřejněných výsledků. Pro správný chod celého experimentu je zapotřebí vytvořit metodiku měření, která je zde rovněž uvedena. Nedílnou součástí každého experimentu je i vyhodnocování výsledků měření, proto i v této práci je připravena metodika vyhodnocení vzorků. Všechny předchozí body jsou opřeny o praktická měření, které byly provedeny na popsáních zařízeních.

## 3 Rešerše

### 3.1 Způsoby generování kavitačních zón

Generace kavitačních zón lze realizovat různými způsoby. Z počátku výzkumu kavitačních zón se využívaly hydrodynamické systémy. Později s rozvojem elektroniky a rozvojem fyziky piezoelektrik a magnetostrikčního jevu se postupně přecházelo na různé soustavy ultrazvukových měničů, které jsou schopny vytvářet intenzivní ultrazvukové pole o kmitočtech v intervalu od  $20\text{ kHz}$  do  $60\text{ kHz}$ . Pro tuto studii jsou nejvýznamnější piezoelektrické systémy, proto se v dalších kapitolách budeme zabývat zejména těmito systémy a další budou uvedeny pouze okrajově [2].

#### 3.1.1 Hydrodynamické systémy

V turbulentním proudění kapaliny vzniká hydrodynamická kavitace v důsledku proměnlivosti rychlostního pole v čase a prostoru. Turbulentní proudění vlivem tečných sil vzniká mezi vrstvami kapaliny nebo u stěny pevných těles. Takto vzniklá kavitace může nabývat různé intenzity podle hydrodynamických vlastností kapaliny. Nejjednodušší systém je tryska ponořená do kapaliny, z níž proudí kapalina o určité rychlosti. Tok kapaliny za ústím trysky způsobuje kavitaci. Hydrodynamické systémy generace kavitačních zón mají různé podoby, ale podstatě se skládají z těchto součástí [2].

- tryska
- rezonanční prvek
- nádoba s kapalinou <sup>1</sup>
- tlakové čerpadlo včetně regulátoru tlaku

Z trysky kruhového nebo obdélníkového průřezu proudí kapalina o rychlosti závislé na vstupním tlaku kapaliny do trysky. V ose proudění je v určité vzdálenosti od ústí trysky umístěn rezonanční prvek opatřen z obou stran břity. Vlivem periodicky se tvořících vírů kapaliny se rozkmitá i destička. Pokud se shodují vlastní frekvence destičky s periodickou frekvencí vírů, destička rezonuje. Další principy jsou založeny na rotujících kotoučích vhodně tvarovaných a uložených v nádobách tak aby opět docházelo k intenzivní kavitaci. Hydrodynamické generátory mají velké využití zejména v průmyslu k homogenizaci suspenzí

---

<sup>1</sup> V níž jsou uloženy tryska a rezonanční prvek.

a dalším podobným účelům. Některé z nich však nacházejí využití ke studiu kavitační eroze [2].

### 3.1.2 Magnetostrikční systémy generující kavitaci

V předchozím článku jsme popsali některé piezoelektrické a elektrostrikční systémy pro generaci kavitačních zón. Ve výzkumu kavitace jsou také používány systémy zhotovené z magnetostrikčních měničů, kterými lze generovat výkonná ultrazvuková pole, v rozsahu 16 kHz až 100 kHz. Přestože elektroakustická účinnost měničů magnetostrikčních měničů bývá o mnoho menší než účinnost piezoelektrických, využívají se v celé řadě soustav generujících kavitaci [2].

- **Magnetostrikce**

Magnetostrikce je vlastnost feromagnetických materiálů, která způsobuje jejich deformaci po vystavení magnetickému poli. Děj byl poprvé popsán v roce 1842 Jamesem Joulem. Ve feromagnetických látkách se nacházejí tzv. *Weissovy oblasti*, neboli *domény* představují elementární magnety trvale zmagnetované. Pokud je materiál mimo magnetické pole, jednotlivé domény zaujímají různé směry magnetické polarizace a tím se materiál navenek jeví jako nemagnetický. Vlivem vnějšího magnetického pole nastanou změny v uspořádání těchto domén a tím dojde ke zmagnetizování. Při těchto změnách domén vzniká také mechanické pnutí, takže rozměry feromagnetických těles se mění. Uvedený jev se nazývá *magnetostrikce*. Magnetostrikcí se některé materiály (např.: železo) ve směru magnetizace prodlužují a ve směru kolmém zkracuje, přičemž objem zůstává prakticky stejný. Např. Nikl se oproti železu v magnetickém poli zkracuje [2].

- **Provedení magnetostrikčních měničů**

Nejjednodušším magnetostrikčním ultrazvukovým měničem je tyč z vhodného magnetika. S ohledem na elektrické ztráty ve střídavě magnetované tyči, se obvykle zhotovují nejen tyče, ale i měniče z plechů o tloušťkách 0,05 až 0,2 mm, navzájem tmelených epoxidovou pryskyřicí. V příloze č. 2 je jednoduchý magnetostrikční měnič z tenkých plechů. Důležité je, aby plechy od sebe byly izolovány vrstvou oxidu. Vinutí měniče je přes kapacitu

C připojeno na výstup vysokofrekvenčního generátoru, kdežto předmagnetizace<sup>2</sup> je připojena přes tlumivky  $Tl_1$  a  $Tl_2$  na zdroj stejnosměrného polarizačního proudu. Proto jedním vynutím protéká jak proud střídavý, tak proud předmagnetizační. Další provedení měničů jsou v příloze č. 3 [2].

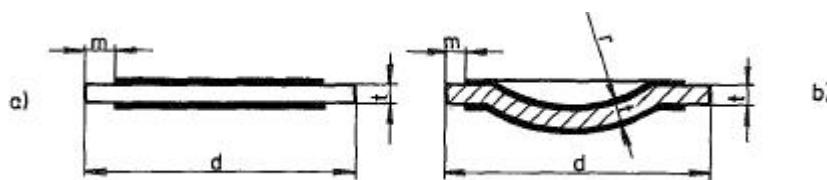
### 3.1.3 Piezoelektrické systémy generující kavitaci

- **Piezoelektrický jev**

Piezoelektrický jev (z řeckého *piezin* - *tlačit*) je schopnost krystalu budit elektrické napětí při jeho deformaci nebo naopak kdy se v elektrickém napětí krystal deformuje. Deformací materiálu se ionty opačných nábojů v krystalové mřížce posunou tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která původně souhlasila, se od sebe vzdálí. Takto se na některých plochách krystalu objeví náboj. Při obráceném piezoelektrickém jevu při tzv. elektrostrikcii, působí vnější elektrické pole posunutí iontů, což vede k deformaci krystalu. Pokud dojde k překročení určité teploty u daného materiálu, dochází k náhlé ztrátě piezoelektrických vlastností, protože se uspořádání iontů. K takovéto změně vlastností dojde skokově, podobně jako ke změně skupenství. Přechodová teplota se nazývá Curierova teplota [2].

- **Příklady provedení piezoelektrických měničů**

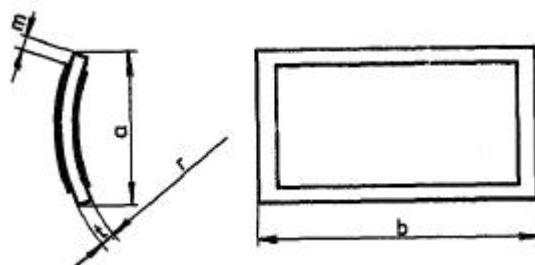
Piezoelektrický nebo elektrostrikcí výbrus musí být opatřen elektrodami na které je přiváděn elektrický příkon z generátoru. Existují různé varianty uchycení výbrusů, které se obvykle vyrábějí ve tvaru destiček buď kruhových (Obr. 2a) průměru  $d$ , tloušťky  $t$ , nebo ve tvaru vyduté plochy poloměru křivosti  $r$ , tloušťky  $t$ , průměru  $d$  (Obr. 2b) [2].



**Obr. 2** a), b) Různá provedení elektrostrikcích měničů [2]

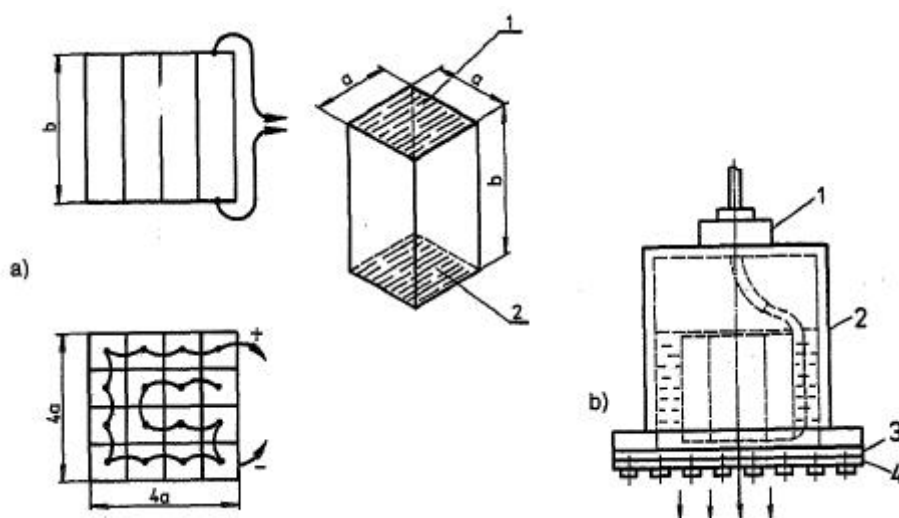
<sup>2</sup> Jinak také polarizace. Frekvence měniče  $f_m = 2f_{sp}$ , kde  $f_{sp}$  je frekvence střídavého proudu, kterým se magnetuje magnetikum. Předmagnetizací je dosaženo rovnosti mezi těmito frekvencemi. Zároveň dojde ke zvětšení amplitudy a tak pracuje měnič účinněji.

Pro některá technická využití zhotovujeme destičku jako na *obr. 3*, o rozměrech  $a$ ,  $b$  a poloměru křivosti  $r$ . Elektrody jsou zakončeny od kraje ve vzdálenosti  $m$  a to proto, aby nedocházelo, zejména u křemenných výbrusů s vysokým přiváděným střídavým napětím, k přeskokům střídavého elektrického napětí [2].



**Obr. 3** Elektrostriční měnič o poloměru křivosti  $r$  [2]

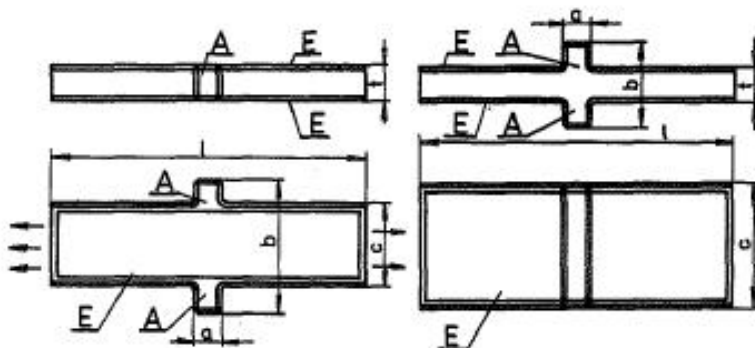
Více kvádrových výbrusů je lepeno epoxidovým lepidlem, skládáno do soustavy a jsou na ně přidělány elektrody 1, 2, které se navzájem propojí vodičem (*Obr. 4a*). Soustava je uložena do pouzdra 2 (*Obr. 4b*). Teplo produkované měničem je odváděno tekutinou, ve které jsou měniče ponořeny, na pouzdro chlazené kapalinou, do které měnič vyzařuje přes laděnou desku 4. Tato je přišroubována na pouzdro 2 přes těsnicí vložku 3. Vysokofrekvenční napětí je na měniče přiváděno kabelem 1. Výbrusy popisovaného měniče jsou vyrobeny z titaničitanu barnatého a pracují na frekvencích 40 až 100 kHz [2].



**Obr. 4** a) Soustava elektrostričních výbrusů; b) uložení soustavy elektrostričních měničů [2]

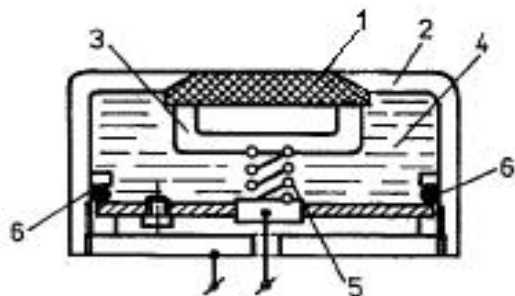


Elektrostriční měniče ve tvaru desek kmitající podélně na frekvencích mezi 20 a 40 kHz vidíme na *obr. 5*. Tyto jsou osazeny elektrodami *E* a kmitají ve směru délky *l*. V místě uzlu podélného kmitu je deska uložena v držáku, který je upevněn ve výstupku desky *A*.

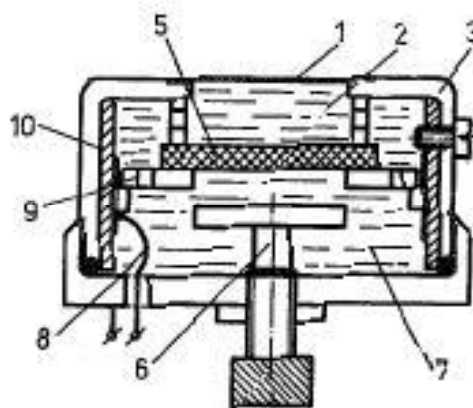


**Obr 5** 2 provedení podélně kmitajících elektrostričních měničů [2]

Elektrody výbrusů generující aktivní ultrazvukové pole o intenzitě nejméně  $5 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> jsou připevněny vpalováním. U křemenných výbrusů musí elektrody končit nejméně 2,5 mm od hrany výbrusu jinak dojde k přeskoku vysokofrekvenčního napětí mezi elektrodami a v důsledku velkého tepelného účinku dojde k vážnému poškození výbrusu. Pro zvýšení elektrické pevnosti jsou výbrusy ponořeny do transformátorových olejů, které ovšem s přiváděným vysokofrekvenčním napětím svojí elektrickou pevnost částečně ztrácí. Z tohoto důvodu je velice důležité, aby olej byl bez nečistot Zahřívá se na teplotu 110°C aby se odstranila případná vlhkost [2].



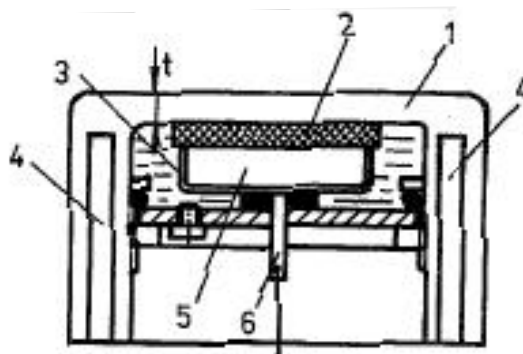
**Obr. 6** Způsoby provedení držáku [2]



**Obr 7** Výbrus uložený v transformátorovém oleji [2]

Na *obr. 6* je vidět jedno z možných provedení držáků měniče. Výbrus *1* se dvěma elektrodami na protějších stranách je zapuštěn do pouzdra *2*. Jeho vnější elektroda je v rovině s povrchem pouzdra a zároveň jsou tyto dvě části spolu v elektrickém kontaktu. Z vnitřní strany na výbrus přiléhá komůrka *3* vytvářející vzduchový polštář, který společně s pružinou *5* je zároveň přívodem vysokorychlostního napětí na pokovenou plochu výbrusu (elektrodu). Vnitřní prostor *4* je vyplněn jakostním transformátorovým olejem. Celý tento prostor je utěsněn těsnícím kroužkem *6* [2].

Jiná úprava je na *obr. 7*. Oboustranně pokovený křemenný výbrus *5* je po obvodě upevněn v držáku, takže vysokofrekvenční napětí se přivádí přes pružinu *8* a část *9* zašroubovanou v izolantu *10*. Vzdálenost reflektoru *6* od výbrusu se dá nastavit podle daného kmitočtu na optimální účinnost výbrusu. Ten je pak vyzařován do vnějšího prostředí přes membránu *1*. Transformátorový olej zvyšuje elektrickou pevnost v okolí výbrusu a také slouží jako akustické transmisní prostředí. Držáky se dnes vyrábí tak aby nebyli moc citlivé na nešetrné zacházení, ale i takové, které dovedou vytvořit pole v elektricky vodivých kapalinách. Takovýto způsob je vyobrazen na obrázku *obr. 8*. Křemenný výbrus *2* přiléhá těsně nebo je přitmelen na vyleštěnou desku *1*. Komůrka *3* opět vytváří vzduchový polštář *5*. Vzhledem k vysokým vyzařovaným výkonům měniče je soustava chlazena vodou, která je přiváděna kanálky *4*. Vysoké vysokofrekvenční napětí je přiváděno elektrodou *6* přes komůrku *3* na elektrody výbrusu [2].



**Obr. 8** Provedení ultrazvukového piezoelektrického měniče s laděnou deskou [2]

Keramické elektrostriční měniče jsou dalším typem transformátorů. Jejich výhodou je, že nevyžadují vysoké napětí. U výkonnějších se používá keramického skla a taveného křemene. Obvyklé plastické hmoty s dobrými izolačními vlastnostmi nelze použít právě pro tyto vyšší výkony. Další úpravy měničů slouží k ozáření protékajících kapalin nebo chemicky agresivních látek. [2]

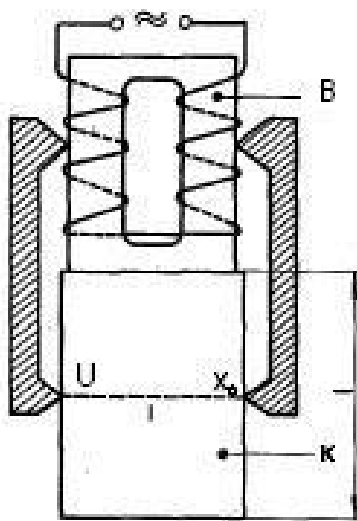
### 3.1.4 Akustické transformátory

*Pevné akustické transformátory* jsou používány jak u piezoelektrických, tak i u elektrostričních a magnetostrických měničů. Na konci akustického transformátoru vzroste s amplitudou výchylky  $A$  koncové plochy takového vlnovodu, rovněž i rychlost  $v$  podle vztahu [2]:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = A\omega \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad [mm] \quad (1)$$

kde  $u$  je (okamžitá) akustická výchylka,  $A$  je akustická amplituda výchylky  $t$  je čas,  $c$  je rychlost šíření akustického vlnění,  $x$  je souřadnice šíření akustického vlnění a  $\omega$  je uhlová frekvence vlnění [13].

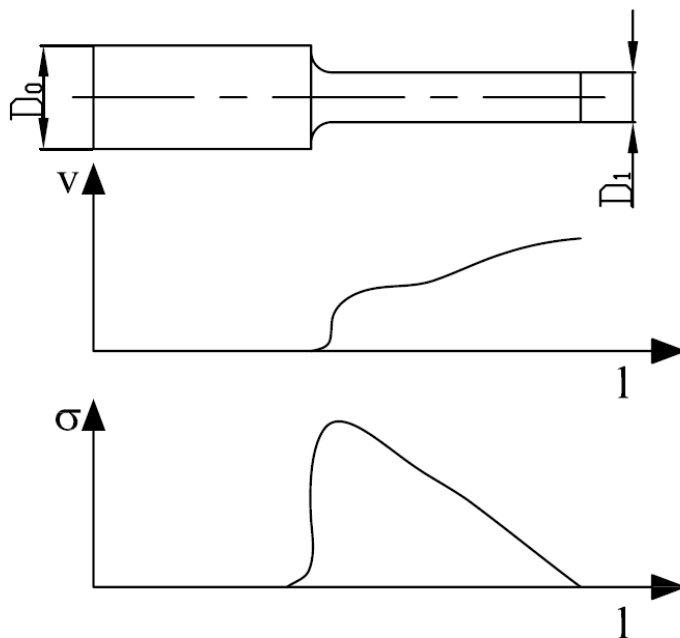
V praxi se zhotovují různé druhy vlnovodů, jako např. válcovité, stupňovité, kónické, exponenciální, katenoidální a fourierovské.



**Obr. 9** Nejjednodušší válcový akustický transformátor [2]

Základním vlnovodem je vlnovod  $K$  ve tvaru válce o délce  $l$  tak jako tomu je na *obr 9*. Tento typ se používá tam, kde nelze ponořit ultrazvukový měnič přímo do prostředí, ve kterém chceme vyvolat kavitační pole, proto je na měnič připojen  $B$  tvrdou pájkou vlnovod. Z části vlnovodu a vlastního měniče lze odvádět teplo chladicí kapalinou. Amplituda výchylky je na konci vlnovodu menší, než je amplituda samotného měniče. Toto zmenšení je způsobeno akustickými ztrátami, ale pokud zvolíme vhodný materiál, jsou akustické ztráty

relativně malé, tak že je ve výpočtu těchto transformátorů neuvažujeme. Pokud je potřeba zvětšit výchylku, používá se jiných úprav vlnovodů. Stupňovitý vlnovod, jenž je použit v našem experimentu, je znázorněn na *obr. 10* i s grafy závislosti akustické rychlosti  $v$  a mechanického napětí  $\sigma$  na délce  $l$  vlnovodu. Je vidět, že amplituda rychlosti je na konci vlnovodu, kdežto amplituda mechanického napětí je zhruba v polovině. Vlnovod musí být navržen tak aby rezonoval na stejné frekvenci jako měnič, jenž ho rozkmitává. Pokud tomu tak není, dochází ke snížení účinnosti s ohledem na jeho zesilovací účinek. Pro návrh vlnovodu vycházíme z vlastní frekvence  $f$  soustavy a průměrů  $D_0$  a  $D_1$ . Nutností je výpočet rychlosti šíření objemového vlnění v daném materiálu [2].



**Obr. 10** Stupňovitý vlnovod průběhy napětí a rychlosti ve vlnovodu [2]

V příloze č. 4 můžeme vidět profily ostatních typy vlnovodů uvedených výše.

Pokud je za potřebí vlnovod upevnit, učiní se tak v místě uzlu vlnovodu přivařením k přírubě. Jestliže se místo upevnění nepohybuje, pak teoreticky nedochází k přenosu ultrazvukových vln do míst kde je vlnovod umístěn. Ve skutečnosti k těmto přenosům dochází díky akustickým zátěžím na konci vlnovodu, jako jsou svařování vrtání atd. Proto se přistupuje k různým úpravám. Pozici uzlových bodů lze určit přibližně výpočtem nebo experimentálně pomocí hrotových snímačů vibrací. Při některých aplikacích se používají vlnovody s připevněnou laděnou deskou na jeho volném konci (viz. Příloha č. 5) [2].

### **3.2 Současné způsoby zpevňování povrchů**

Povrchová vrstva oceli je obecně méně odolná než zbytek objemu materiálu. Má odlišnou strukturu a chemické složení oproti vnitřnímu složení. Zároveň je vystavená nepříznivým vlivům okolí. Proto je nutné povrchové vrstvy zpevňovat. Tyto operace se dají provádět zvyšováním plastické deformace. Důsledkem toho je vznik tlakového zbytkového pnutí a únavové pevnosti. Mezi způsoby prováděné tzv. za studena řadíme kuličkování a válečkování [12].

Kuličkováním se zpevňuje povrchová vrstva vrženými kuličkami proti zpevňovanému povrchu. Dochází tak k plastické deformaci zmenšující pórovitost povrchu a zvyšující pevnost [12].

Válečkování se provádí přitlačováním a odvalováním volně otočných válečku. Touto operací se zmenšuje drsnost povrchu, zvyšuje se únavová pevnost a korozní odolnost a opět zpevňuje povrchovou vrstvu [12].

Mezi další způsoby, jak dosáhnout vyšších pevností povrchových vrstev oceli, patří cementace resp. nitridace resp. nitrocementace, jenž spadá mezi tepelně-chemické úpravy. Dochází při nich k sycení povrchu materiálu uhlíkem resp. dusíkem resp. uhlíkem a dusíkem současně a tím ke zpevnění. Plastické deformace povrchu lze dosáhnout také kalením a řadou dalších tepelných úprav podle druhu materiálu, pro který je dané zpracování vhodné [9].

### **3.3 Současný stav zpevňování povrchových vrstev pomocí kavitace.**

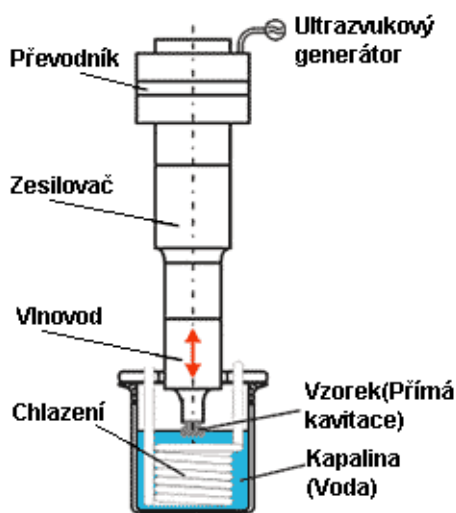
Tento technologický postup je poměrně nový a nachází se ve stavu výzkumu a vývoje. Během experimentů zkoumající dopad kavitační eroze na kovové materiály se zjistilo, že v inkubační době došlo k plastické deformaci. V důsledku toho vzniká zbytkové pnutí a zpevnění povrchových vrstev. Dalo se tedy usuzovat, že lze kavitaci využít k nekonvenční metodě zpevňování povrchových vrstev [5], [6].

Literatura zabývající se touto problematikou zatím není vydána v ucelené formě, nýbrž ve formě vědeckých článků popisujících experimenty. Články popisují schéma zapojení experimentu a podmínky, za kterých byl experiment proveden. Závěry studií jasně poukazují na vysoký potenciál této metody. Všechny práce zdůrazňují zejména nedestrukční povahu kavitace při zpevňování, tzn.: že při dodržení určitých podmínek pro určité materiály nedochází ke vzniku mikrotrhlin a to je důležité především u tvarově složitých součástí.

Poměrně snadno se dá změnit intenzita kavitačního pole a to v případě vibračních soustav i hydrodynamických (proudících) soustav. Například změnou velikosti trysky nebo vstupního tlaku trysky. Naproti tomu hloubka ovlivněné vrstvy je menší než u kuličkování [5], [6].

### 3.4 Test kavitační odolnosti materiálů (Cavitation Erosion Test)

Norma, podle které se provádí test kavitační odolnosti materiálů má označení ASTM G32-06. Testy kavitační odolnosti materiálů mohou být přímé anebo nepřímé<sup>3</sup>. V Prvním případě (dynamický vzorek) je vzorek připevněn k vlnovodu (sonotroda) a díky tomu kmitá stejně jako vlnovod jak je tomu na *obr. 11*.



**Obr. 11** Schéma sestavy pro test podle ASTM G32 – 06 [14]

Druhý případ, tedy nepřímá kavitace (stacionární vzorek) se liší polohou vzorku vůči vlnovodu. Vzorek je ve vzdálenosti 0,5 až 0,7 mm od špičky vlnovodu. V nádrži s chlazením je destilovaná voda o teplotě  $25 \pm 2$  °C při atmosférickém tlaku. Pro dosažení přesných výsledků je důležité provést test při určité amplitudě např. 50  $\mu\text{m}$ .

### 3.5 ICET databáze

Existuje také mezinárodní databáze zkoušek kavitační odolnosti materiálů (*international cavitation erosion test database*), která obsahuje výsledky různých způsobů zkoušek prováděných na škále materiálu za odlišných podmínek. Na sestavení a rozšíření dat databáze se podílí velký počet vědeckých institutů z celého světa. Mezi ně patřili i dvě z české

<sup>3</sup> resp.: jedná-li se o vzorek buď dynamický anebo stacionární

republiky. *SIGMA Výzkumný a vývojový institut a Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava* [8].

Na materiálech uvedených v tabulce *Tab. 1* je prováděn test kavitační odolnosti materiálů podle.

**Tab. 1.** *Seznam testovaných materiálů*

Obecný popis	Katalogové jméno
Železo ARMCO	E04
Hliníková slitina	PA2
Uhlíková ocel	45
Kyselinovzdorné oceli	1H18N9T
Jednofázový mosaz	M63
Polyamid 6	Tarnamid

### 3.5.1 Prováděné testy

V rámci databáze je prováděno několik typů zkoušek. Téměř polovina testů byla provedena pomocí vibračních soustav tzn. pomocí piezoelektrických nebo magnetostrikčních měničů. Frekvence těchto souprav byla okolo 20 kHz, což odpovídá již zmiňované normě ASTM G32. Výjimku tvoří několik testů provedených o frekvenci 8 kHz. Daleko větší rozmanitosti testů si lze všimnout v amplitudě výchylek, ve velikosti a způsobu upnutí vzorků. Okrajově se použilo stacionárních vzorků.

Několik testů bylo provedeno pomocí hydrodynamických generátorů.<sup>4</sup>

### 3.5.2 Cíl

Hlavním smyslem databáze je umožnit snadný přístup k většině zdrojových dat dodaných přispěvateli a tím tak umožnit volně diskutovat o výsledcích zkoušek. Slouží zároveň k rozšíření dalších údajů a použití pro potřeby ostatních partnerských testů. Další důležitou úlohou je vytvoření základu pro další standardizaci metod používaných pro hodnocení materiálové odolnosti proti kavitačnímu poškození [8].

---

<sup>4</sup> Podrobněji popsáno v [2], [6]

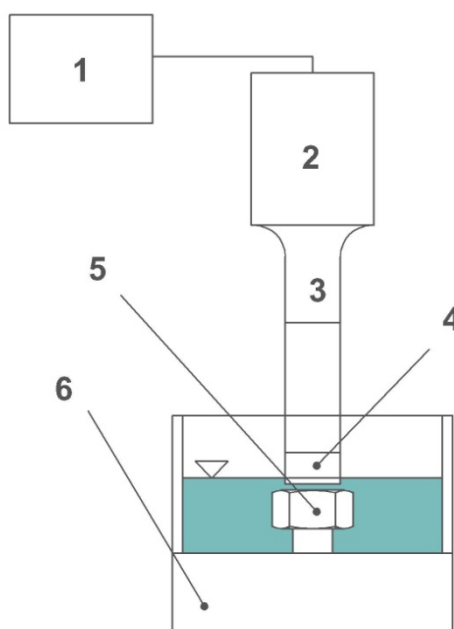
### 3.5.3 Obsah

Současná verze databáze ICET obsahuje hlavní příspěvky laboratoří a testovacích zařízení tj. kontaktní informace o zařízeních, která poskytla výsledky svých testů. Dále seznam materiálů, jejich fyzikálních vlastností, jejich složení a jejich tepelné zpracování. V další sekci databáze najdeme údaje o zkušebních zařízeních a jejich standardních parametrech. Poslední část databáze nám ukazuje výsledky testů a podmínky za jakých byly provedeny. Výstup těchto testů je proveden formou tabulek i grafů závislosti ztráty hmotnosti (nebo ztráty objemu nebo zvětšení hloubky poškození) na čase [8].



## 4 Popis zařízení

Jako základ experimentálního zařízení pro testování zpevnění povrchů materiálů pomocí kavitace byl použit piezoelektrický systém na obrábění skla, který je vidět na Obr. 12. Toto zařízení můžeme použít pro zpevňování povrchových vrstev pomocí kavitace. Pro naše účely byly ze soupravy demontovány nepotřebné části. Tzn., že nyní se sestava skládá z ultrazvukového generátoru (1), elektromechanického měniče (2) se zesilovačem (3) a sonotrodou (4). Tyto tři posledně zmiňované komponenty tvoří jeden celek, jenž je upnut do stojanu. Vzorek (5) vystavený kavitaci je ponořen v nádobě s vodou (6) stejně tak i nástavec sonotrody. Celá sestava, tak jak byla použita je vyfocena v příloze č. 6.



**Obr. 12** Schéma sestavy experimentu

### 4.1 Ultrazvukový generátor

Výkonový ultrazvukový generátor *UG2000/20 kHz* (viz. Příloha č. 7) pro buzení piezoelektrických měničů se jmenovitým výkonem. Jedná se o generátor s cizím buzením, v jehož koncovém stupni se nachází tranzistory IGFET<sup>5</sup> řízené elektrickým polem a zapojené dle jmenovitého výkonu do můstku nebo do půl-můstku. Výstupní výkon je možné regulovat autotransfornátorem v rozmezí 5 - 100%. Pracovní frekvenci je možno přeladit v rozmezí cca

<sup>5</sup> Insulated – Gate Field – Effect Transistor

5% jmenovité frekvence. Obvod automatického doladění kmitočtu AFC<sup>6</sup> stabilizuje nastavení generátoru na pracovní frekvenci měniče. Generátor má galvanicky oddělené výstupy pro snímání důležitých parametrů. Celé zařízení chladí dva ventilátory [4].

**Tab. 2** Parametry generátoru [4]

Typ sítě				1NPE 230/50 Hz, TN-S			
Instalovaný elektrický příkon [kVA]				0,15 - 2,15			
Jmenovitý výkon [kW]				2			
Regulace výstupního výkonu [%]				5 - 100			
Pracovní frekvence [kHz]				20			
Rozladění [%]				5			
Výstupní výkonový konektor				PL			
Datový výstup				Cannon 9			
1. signál. zem	2. frekv. TTL	3. signál. zem	4. výkon (0 - 10 V)	5. napětí (0 - 10 V)	6. proud (0 - 10 V)	8. zem	9. +5V/50mA
Krytí generátoru				IP 40/00			
Vnější rozměry (š x v h) [mm]				600 x 500 x 500			
Hmotnost generátoru [kg]				35			

Podsestava piezoelektrický měnič – koncentrátor (*Příloha č. 8*) je upnuta do multifunkčního stojanu Proxxon BFB 2000, který se primárně užívá pro obráběcí operace vrtání a frézování. I přesto dostatečně poslouží pro upnutí sestavy. V experimentu je také používán k nastavení správné vzdálenosti konce sonotrody od vzorku.

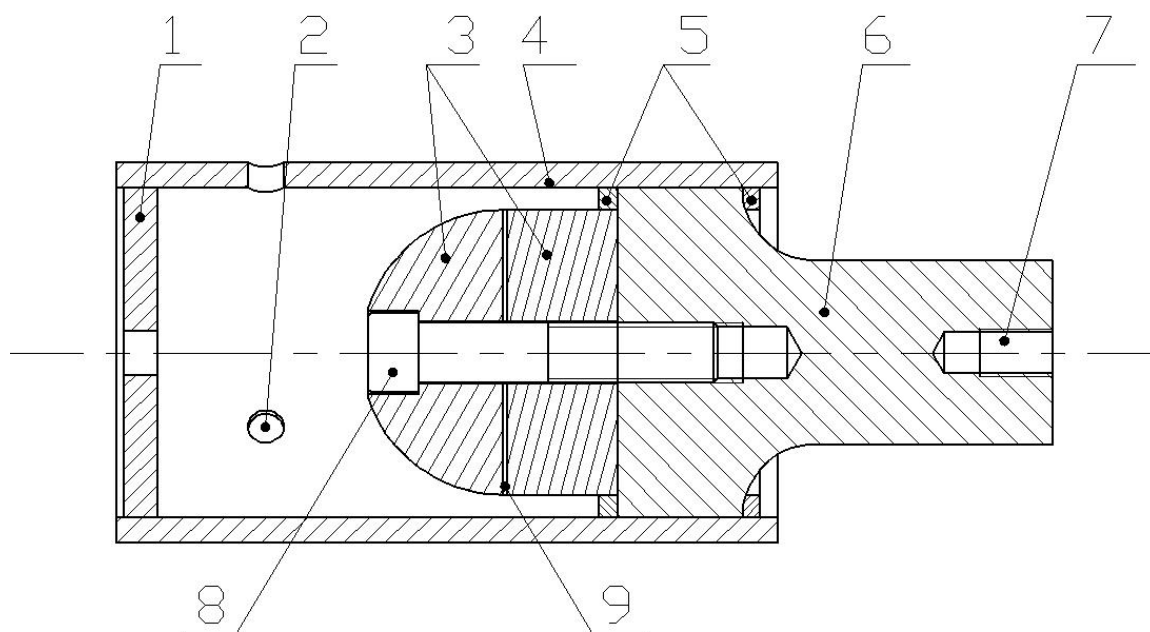
## 4.2 Elektromechanický měnič

### 4.2.1 Konstrukce elektromechanického měniče

Elektromechanický měnič používaný pro experiment je měnič využívající piezoelektrického jevu. Konstrukce měniče je provedena podle *obr. 13*. Jedná se o sendvičové uspořádání. Krystal (3) je uchycen mezi hlavu šroubu (8) a držák (6), který je zároveň spojovací částí s vnějším prostředím a zářičem. Závitová díra (7) slouží k uchycení půlvalného nástavce. Krystal rozdělený na dvě části je proložen elektrodou (9) díky níž je přiváděn střídavý proud do krystalu. Umístění elektrody je zvolena tak aby docházelo k deformaci krystalu ve směru kolmém k ploše elektrody. Jako druhá elektroda slouží obal sonotrody (4). Ve víčku (1) jsou dva otvory pro přívod chladicího vzduchu a z vnější strany víčka je

<sup>6</sup> Automatic Frequency Control

konektor pro přívod elektrické energie. Otvory (2) plní též chladičí funkci. Tyto otvory se využijí při vyšších výkonech.



**Obr. 13** Schéma piezoelektrického měniče s vlnovodem [7]

### 4.3 Akustický zesilovač

V našem experimentu je použit stupňovitý koncentrátor. Tento typ je konstrukčně jednoduchý a zároveň poskytuje velké zesílení. Naproti tomu stojí fakt, že v místě přechodu válců dochází k maximálnímu namáhání koncentrátoru, což způsobuje pukání materiálu při vysokých výkonech. Tomu lze do jisté míry zabránit vhodným poloměrem zaoblení přechodu [7].

### 4.4 Nádoba, vzorek

Nádoba se skládá z ocelového bloku tvořící dno nádoby. Ke dnu nádoby jsou přilepeny destičky z plexiskla. Jako vzorky experimentu byly použity metrické šrouby z oceli a mosazi. Povrch hlav byl vybroušen. Vzorek je vložen do díry ve dně a je jištěn šroubem s vnitřním šestihranem, jehož osa směřuje kolmo na osu vzorku. Vzorek je ponořen ve vodní lázni, stejně jako konec vlnovodu. Teplota vodní lázně byla během experimentu stejná jako teplota okolí což činí cca 21 °C.

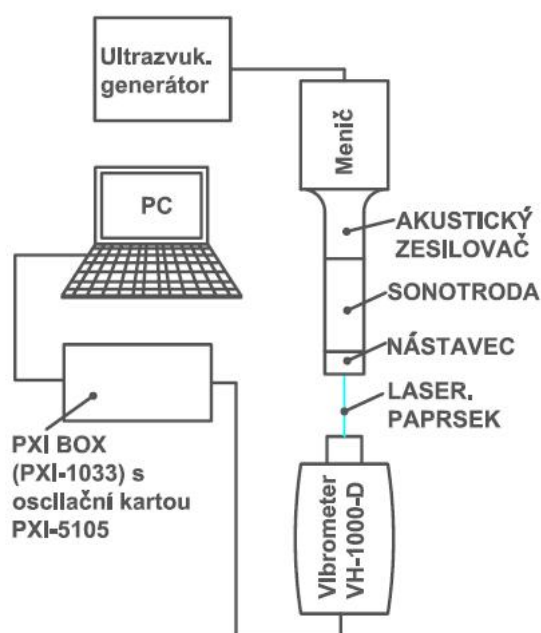
Jako vzorky byly zvoleny metrické ocelové a metrické mosazné šrouby  $M6 \times 25$ . Materiály byly vybrány tak aby se co nejvíce blížili vlastnostem materiálů používaných při zkouškách z ICET databáze.



**Obr. 14** Nádoba s vodní lázní, upnutým mosazným vzorkem a ponořenou sonotrodou.

## 4.5 Vibrometr

Při našem experimentu chyběla možnost automatického nastavení amplitudy kmitání, proto bylo užito vibrometru k měření vibrací sonotrody. Byl použit přístroj Ometron VH 1000 D. Jedná se o přenosný vibrometr, který se používá pro bezkontaktní měření vibrací. Umožňuje měřit vibrace v kmitočtovém pásmu 0,5 Hz do 22 kHz za použití tří měřících rozsahů a to 20 mm/s, 100 mm/s a 500 mm/s [11]. Na obr. 17 je schéma zapojení vibrometru ve vibrační soustavě. V příloze č. 9 je zapojený vibrometr do soustavy vyfocen.



**Obr. 15** Schéma zapojení aparatury s vibrometrem OMETRON VH – 1000 D

## 4.6 5 slotový PXI box

Dalším článkem v sestavě pro měření vibrometrem je PXI Box *NI PXI – 1033* s oscilační kartou *PXI – 5105*. PXI je PC – platforma pro měření a automatizační systémy. PXI – 1033 Box poskytuje napájení chlazení a komunikační sběrnice PCI a PCI Express pro PXI řadiče a moduly. Tato 5slotová varianta s integrovaným MXI-Express řadičem nabízí propustnost 110 MB/s. Pro naše účely byla instalována osciloskopická karta PXI-5105, která funguje jako rozhraní mezi PC a vibrometrem. Na *obr. 18* je vyfotografované zařízení [9].



**Obr. 16**      *Fotografie NI PXI – 1033 s osciloskopickou kartou PXI - 5105*

## 5 Měření

### 5.1 Působení kavitačního pole na vzorek

Po upnutí vzorku do nádoby s vodní lázní byla nastavena vzdálenost sonotrody od vybroušené hlavy šroubu pomocí stojanu *Proxxon BFB 2000*. Vzdálenost mezi vzorkem a volným koncem vlnovodu byla v rozmezí 0,5 až 0,7 mm. Poté se nastavil výkon ultrazvukového generátoru na 80% jmenovitého výkonu a frekvence na hodnotu  $f = 19,68$  kHz. Při této frekvenci se zdálo být kavitační pole nejintenzivnější. Stacionární vzorky byly vystaveny působení kavitačního pole v intervalech 10 minut, 20 minut a 30 minut pro každý materiál. Jak vypadá kavitační pole působící na povrch šroubu je vidět v příloze č. 10.

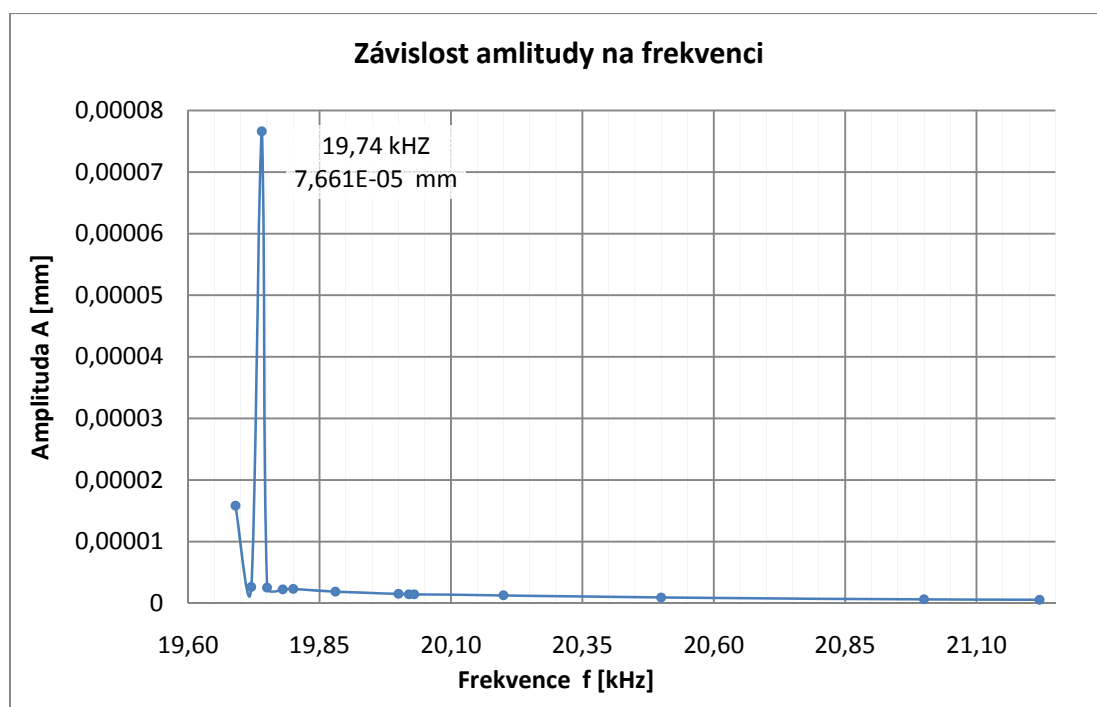
**Tab. 3** Parametry experimentu

			Ocel			Mosaz		
Čas působení	t	[min]	10	20	30	10	20	30
Výkon ul. gen.	P	[%]	80	80	80	80	80	80
Frekvence	f	[kHz]	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68
Výška hladiny	H	[mm]	15	16	16,5	15	16	16

### 5.2 Měření amplitud kmitů sonotrody pomocí vibrometru

Měření jsme provedli, abychom našli frekvenci s co možná největší amplitudou výchylky podélných kmitů a tím největší účinností soustavy. Schéma zapojení vibrometru je zobrazeno na obrázku *obr. 17* v kapitole 3.

Postup měření byl následující. Nejdříve se vůči sobě nastavili sonotroda a vibrometr (viz. *Příloha č. 9*). Následovalo nastavení parametrů na vibrometru. Poté bylo spuštěno samotné měření, jehož výstupní data byla zpracována v MS Excel. Po integraci a znásobení koeficientem pro daný měřicí rozsah vznikl graf výchylek v závislosti na čase pro určitou frekvenci. Toto měření se opakovalo pro 13 frekvencí v intervalu od 16,69 kHz do 21,22 kHz. *Obr. 19* závislosti amplitud na frekvenci byl vytvořen vybráním max. hodnot výchylek jednotlivých frekvencí. Z grafu lze vyčíst, při jaké frekvenci dochází k nejefektivnějšímu vzniku kavitačního pole.







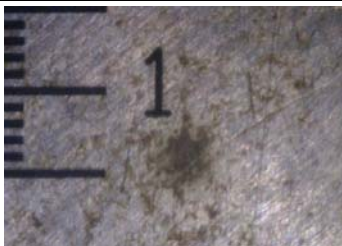

**Obr. 17** Graf závislosti amplitudy na frekvenci

### 5.3 Analýza vzorků pomocí digitálního mikroskopu

Po vystavení vzorků působení kavitačního pole, byly vzorky analyzovány pomocí digitálního mikroskopu Dino – Lite AM413MZTL. Výsledky jsou viditelné v *tab. 4*, jenž je rozdělena do dvou sloupečků podle materiálu a do třech řádků podle času (minut) působení. U vzorků s kratší dobou působení kavitačního pole je poměrně těžké vizuálně rozeznat ovlivněnou oblast naproti tomu u vzorků vystavené kavitačnímu poli po dobu 30 minut je oblast působení jednoznačná. Tyto snímky lze porovnat se snímky pořízené běžným digitálním fotoaparátem ihned po provedení experimentu, které se nachází v *příloze č. 13*. Je potřeba si uvědomit, že působení kavitačního pole byla vystavena téměř celá plocha vzorku a že vyznačené a jasně viditelné oblasti jsou ty, které byly vystaveny nejintenzivnějšímu poli kavitačních bublin (viz. *Příloha č. 11*). Na první pohled můžeme celkem jasně říci, že největší rozdíl je mezi 20 a 30 minutami působení.

Na snímcích je přiloženo i měřítko, podle kterého je možné si udělat představu jak je oblast velká. Nejmenší dílek měřítka je 0,2 mm. Tyto snímky jsou pořízeny při 92 x zvětšení a rozlišení 1,3 megapixel (1280 x 1024 pix). Mikroskop využívá rozhraní USB 2.0 k připojení s PC. V setu je přiložen software, díky kterému je možné mikroskop obsluhovat a pořizovat snímky [10].

**Tab. 4** Snímky oblastí pořízených digitálním mikroskopem

	Ocel	Mosaz
10 min..		
20 min.		
30 min.		

## 5.4 Měření mikrotvrdosti

Pro měření tvrdosti byla použita zkouška podle Vickerse na přístroji *Micromet 2100 Series*, jenž je propojen s PC<sup>7</sup> (viz. *Příloha č. 12*). Indentorem je diamantový jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136°. Zatížení odpovídá symbolu tvrdosti. V našem případě to je *HV 0,1* představující zátěž  $F = 0,98 \text{ N}$ . Měří se délky obou úhlopříček vtisku, který zůstane po odlehčení zatížení. Tvrdost dle Vickerse stanovíme podle vztahu:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad [3] \quad [-] \quad (2)$$

Kde  $d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ [mm]}$  je aritmetický průměr délek úhlopříček,  $F$  je zkušební zatížení v  $\text{N}$ . Doba plného zatěžování je 12 až 15 s [3].

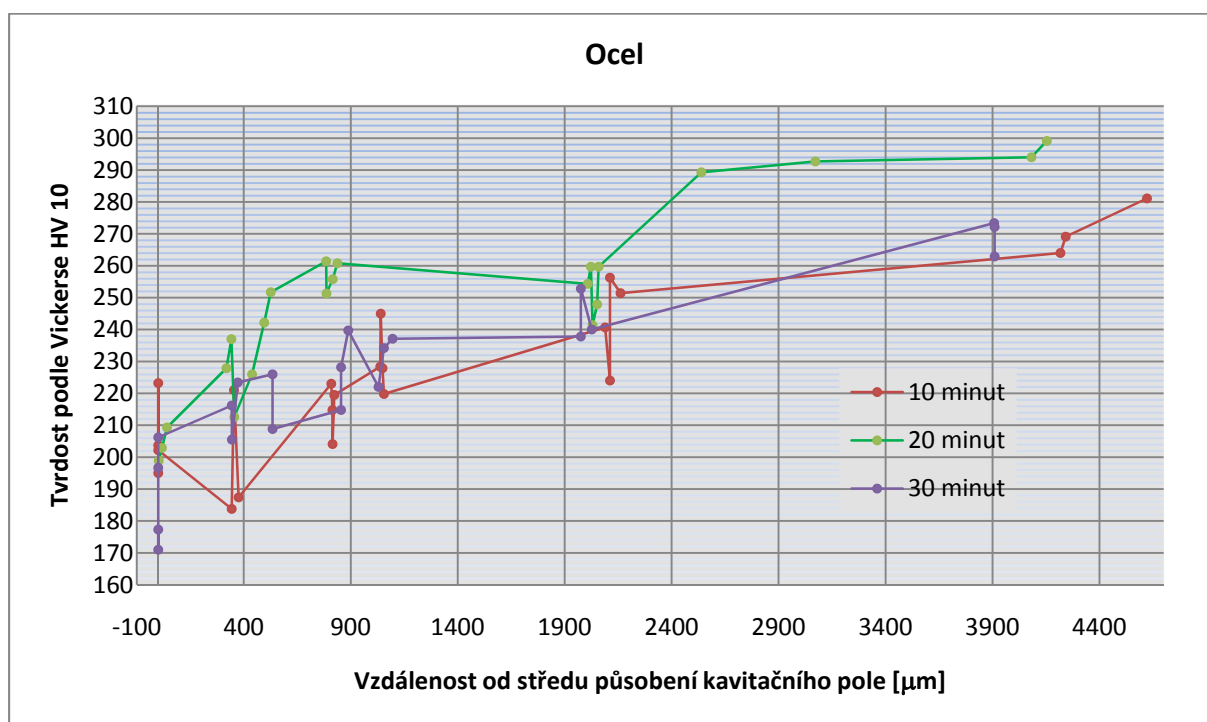
<sup>7</sup> Pouze jeho součásti digitální mikroskop a mikrometrický šroub posuvný ve směru osy  $x$ .



Po upnutí vzorku do přístroje se najde testované místo pomocí mikrometrických šroubů posuvných v osách  $x$  a  $y$ . Do dodávaného software se zadají data o měření, jimiž jsou:

- Měřítka zvětšení
- Velikost zatížení
- Doba zatížení
- Metoda měření tvrdosti
- Referenční bod
- Název vzorku

Tyto parametry vyjma názvu vzorku, se musí nastavit na tvrdoměru samotném. Poté se vymění pomocí otočné hlavy z objektivu na indentor a zahájí se zatížení. Po odlehčení se opět vymění indentor za objektiv a na monitoru PC za pomoci myši se vyznačí vrcholy vpichu. Následuje alespoň 2 další zatížení ve stejné oblasti, po kterých se mikrometrickým šroubem posune do vzdálenější lokace a série zatížení se opakuje. Výpočty tvrdosti provede software a díky zadání referenčního bodu vytvoří i gradient tvrdosti směrem od středu působení. Výstup z měření tvrdosti je možno vidět na *Obr. 20*, kde jsou gradienty tvrdosti pro všechny tři měřené časy ocelového vzorku. V *Tab. 5* jsou uvedeny hodnoty 30 minutového působení ocelový vzorek.



**Obr. 18** Graf mikrotvrdosti ocele podle Vickerse

**Tab. 5** Hodnoty tvrdosti podle Vickerse podle vzdálenosti od středu působení kavitačního pole pro ocelový vzorek.

30min	Oblast[ $\mu\text{m}$ ]	d1 [ $\mu\text{m}$ ]	d2 [ $\mu\text{m}$ ]	d [ $\mu\text{m}$ ]	HV 0,1
1	0	31,3	30,3	30,8	195,0
2	0	30,1	30,2	30,2	203,7
3	0	29,7	27,9	28,8	223,2
4	0	29,9	30,6	30,3	202,2
5	343,9	31,7	31,9	31,8	183,8
6	354,1	28,2	29,7	29	221,0
7	375,9	30,4	32,6	31,5	187,4
8	809,2	29	28,7	28,8	223,0
9	814,1	29,6	29,2	29,4	214,8
10	814,9	30,2	30,1	30,1	204,1
11	823,5	28,7	29,4	29,1	219,5
12	1038,3	28,5	28,5	28,5	228,4
13	1039,9	26,7	28,4	27,5	245,0
14	1048,1	27,9	29,1	28,5	227,9
15	1055,3	28,7	29,4	29	219,8
16	2089,1	28	27,5	27,8	240,7
17	2111,5	28,4	29,1	28,8	224,0
18	2111,7	26,8	27	26,9	256,3
19	2161,3	26,9	27,4	27,2	251,4
20	4217,1	26,4	26,6	26,5	264,0
21	4242,3	25,7	26,8	26,2	269,1
22	4622,1	26,2	25,1	25,7	281,1

Z výsledků měření tvrdosti je zřejmé, že nejvíce ovlivněná oblast překročila ve všech případech inkubační dobu a na místo vytvoření povrchového pnutí již došlo ke kavitační erozi. Graf tvrdostí pro mosazný vzorek a tabulky pro zbytek měření na obou vzorcích jsou v příloze č. 13.

## 6 Zhodnocení práce a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zmapovat současný stav zpevňování povrchů pomocí kavitace, sestavit schéma experimentu pro výzkum zpevňování povrchů pomocí kavitace generované ultrazvukem, dále pak vytvořit metodiku měření a metodiku vyhodnocování vzorků a případně se pokusit o test kavitační eroze na vybraných vzorcích materiálu.

Shrnutí poznatků zabývajících se zpevňováním povrchů pomocí kavitace bylo využito odborné literatury, která je publikována formou popisu provedených experimentů za daných podmínek doporučených normou ASTM G – 32. Nejinak tomu bylo i při vytvoření schématu experimentu, volbě materiálů i vytvoření metodiky měření. Metodika neboli pracovní postup vyhodnocování vzorků je také podstatnou součástí pokusu. V této studii byla vytvořena pomocí běžné technické literatury. Základní měření vlivu kavitace na vybraný povrch bylo provedeno pro zpracování konkrétních výsledků a pro názornější vytvoření metodiky měření a vyhodnocení výsledků.

Jako hlavní přínos této práce je shrnutí faktů o kavitaci, o způsobech generace kavitačních zón i jako inspirace a zdroj informací pro diplomovou práci řešící stejnou problematiku. Provedením několika měření, se mělo pokusit o nalezení hranice mezi inkubační dobou a akumulací dobou, při které již dochází k porušení povrchu materiálu. Z měření tvrdosti, bylo zjištěno, že ve všech měřících intervalech došlo k překročení inkubační doby. Pro použité materiály experimentu již víme, že tato doba je kratší a tohoto poznatku lze využít v dalším výzkumu této metody. I ve srovnání s experimenty a jejich výsledky za podobných podmínek z International Cavitation Erosion Test Database jsme došli k závěru, že inkubační doba je kratší nežli časy v našem experimentu. Pro další experimenty, zkoumající využití kavitace pro zpevnění povrchových vrstev, je důležité se držet výstupů již provedených pokusů a doporučení norem tzn. vzorky vystavit působení kavitace po kratší dobu a tím dosáhnout kýžených výsledků.

Použité zařízení zatím není určeno pro průmyslové či komerční využití. Problematika vytvrzování povrchových vrstev pomocí kavitace je v současnosti otázkou výzkumu, vývoje a vytváření norem. Výhodou této metody s velkou pravděpodobností bude energetická nenáročnost, menší provozní náklady, kratší procesní doba a v neposlední řadě zanedbatelný dopad na životní prostředí.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1]. MÜLLER, Miloš. *Dynamic behaviour of cavitation bubbles generated by laser*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2008. 108 s. ISBN 978-80-7372-241-8.
- [2]. BRDIČKA, Miroslav; SAMEK, Ladislav; TARABA, Oldřich. *Kavitace Diagnostika a technické využití*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. 332 s.
- [3]. MACEK, Karel, et al. *NAUKA O MATERIÁLU : Cvičení*. Praha : Vydavatelství ČVUT, březen 2004. 89 s. ISBN 80-01-02901-8.
- [4]. PH - Soft. *TECHNICKÁ DOKUMENTACE k ultrazvukovému generátoru řady UG2000 /20kHz /35kHz, UG3000 /20kHz*. [s.l.] : [s.n.], 2009. 10 s.
- [5]. ODHIAMBO, Dan; SAYOMA, Hitoschi . Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength of carbonized steel. *International Journal of Fatigue* [online]. 2003, 25, [cit. 2011-04-06]. Dostupný z WWW: < <http://www.sciencedirect.com/science> >.
- [6]. QIN, M.; JU, D.Y.; OBA, R. Improvement on the process capability of water cavitation peening by aeration. *Surface and Coatings Technology* [online]. 15 August 2005, 200, [cit. 2011-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science>>.
- [7]. HENYŠ, Petr. *Zařízení pro vrtání skla ultrazvukem*. Liberec, 2008. 59 s. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [8]. Institute of Fluid-Flow Machinery of the Polish Academy of Sciences . *ICET - International Cavitation Erosion Test* [online]. 1994, 10.02.2003 [cit. 2010-11-05]. Dostupné z WWW: < <http://www.imp.gda.pl/icet/index.htm> >.
- [9]. *National Instruments: Test, Measurement, and Embedded Systems* [online]. 2010 [cit. 2011-04-06]. Dostupné z WWW: < <http://www.ni.com/pxi/> >.
- [10]. Intraco Micro spol. s r. o. *Dinolite.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-12-28]. AM413MZTL :: Dino-Lite. Dostupné z WWW: < <http://www.dinolite.cz/products/am413mztl/> >.

- [11]. OMETRON. *OMETRON Vibration Measurement - Laser Doppler Vibrometry* [online]. 2007 [cit. 2010-11-06]. Portable Digital Vibrometer VH-1000-D. Dostupné z WWW: <<http://www.ometron.com/products/vh1000d.html>>.
- [12]. *Vševěd.cz* [online]. 2005 [cit. 2010-12-25]. Brokování. Dostupné z WWW: <<http://encyklopedie.vseved.cz/kuli%C4%8Dkov%C3%A1n%C3%AD>>.
- [13]. LEPIL, Oldřich . *Fyzika pro gymnázia : Mechanické kmitání a vlnění*. 2.vydání. Praha : Prometheus spol. s.r.o., 1997. 3.5 Ultrazvuk a infrazvuk, s. 89 - 90. ISBN 80-7196-087-X.
- [14]. ASTM G32 - 06. *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 12 s.
- [15]. Část 11. : Vodné turbíny. Určenie špecifickej energie turbíny. Kavitácia. In *Mechanika tekutín* [online]. Žilina : [s.n.], 2006 [cit. 2010-12-20]. Dostupné z WWW: <[http://fstroj.uniza.sk/web/ket/subory/pre%20studentov/mt/Mechanika\\_tekutin-cast\\_11.pdf](http://fstroj.uniza.sk/web/ket/subory/pre%20studentov/mt/Mechanika_tekutin-cast_11.pdf)>.

## 8 Seznam příloh

**Rozsah:** 9 stran

**Příloha č. 1** Snímky z experimentu ukazující implodující bublinu a rychlý proud tekutiny proti povrchu pevného tělesa

**Příloha č. 2** Jednoduchá úprava magnetostrikčního měniče

**Příloha č. 3** Další možnosti provedení magnetostrikčních měničů. Šipky naznačují směr deformace

**Příloha č. 4** Další provedení akustických koncentrátorů

**Příloha č. 5** Ultrazvuková souprava, měnič s laděnou deskou

**Příloha č. 6** Sestava pro generaci kavitačního pole upnuta do stojanu Proxxon BFB 2000

**Příloha č. 7** Výkonový ultrazvukový generátor UG2000/20 kHz

**Příloha č. 8** Podsestava elektrostrikční měnič a akustický koncentrátor

**Příloha č. 9** Aparatura se zapojeným vibrometrem OMETRON VH – 1000 D

**Příloha č. 10** Aparatura pro analýzu vzorků pomocí digitálního mikroskopu Dino – Lite AM413MZTL

**Příloha č. 11** Kavitační pole působící na vzorek

**Příloha č. 12** Přístroj na měření mikrotvrdosti Micromet 2100 Series

**Příloha č. 13** Vzorky a dopad na jejich povrch po působení kavitačního pole, seřazené podle doby působení z leva doprava 10 minut; 20 minut; 30 minut. a) Ocel

b) Mosaz

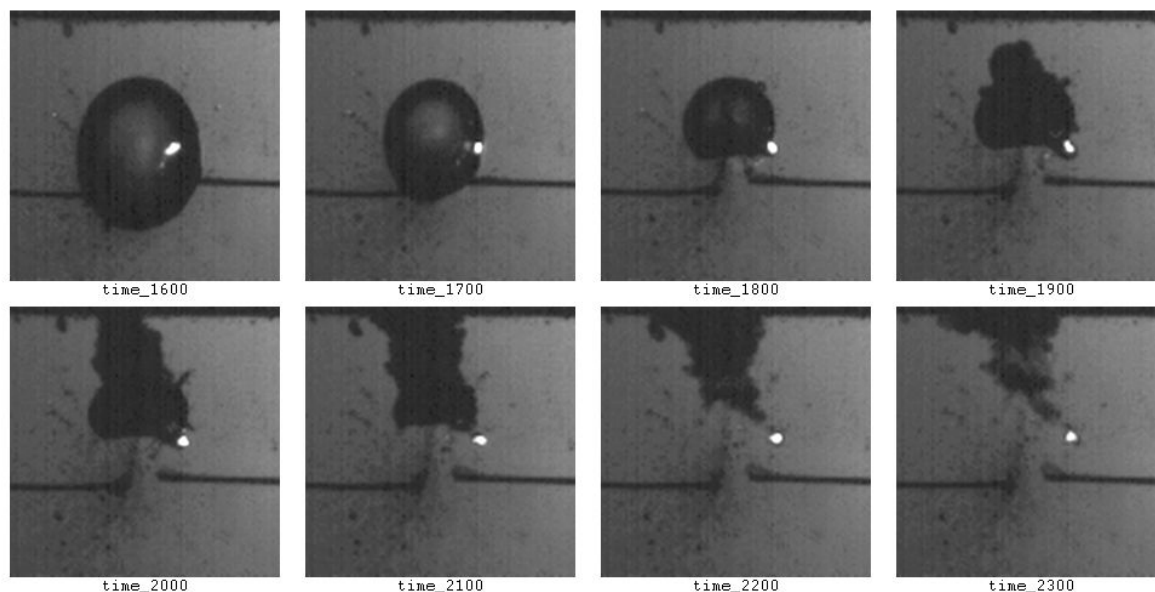
**Příloha č. 14** a) Graf mikrotvrdosti ocele podle Vickerse pro všechny tři měřené časy mosazného vzorku

b) Tabulky tvrdosti podle vzdálenosti od středu působení kavitačního pole pro mosazný vzor

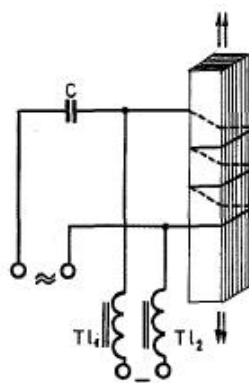
c) Tabulky tvrdosti podle vzdálenosti od středu působení kavitačního pole pro ocelový vzorek

# PŘÍLOHY

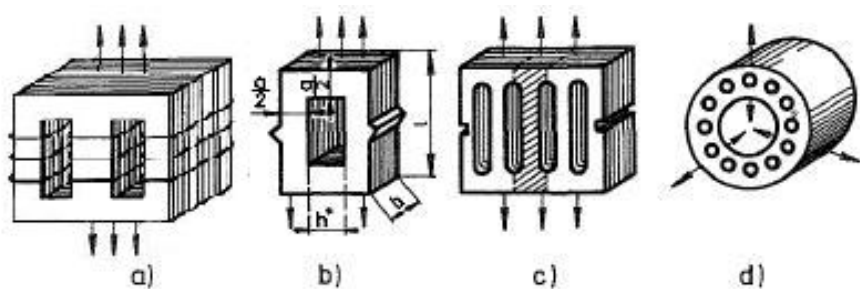
**Příloha č. 1** Snímky z experimentu ukazující implodující bublinu a rychlý proud tekutiny proti povrchu pevného tělesa



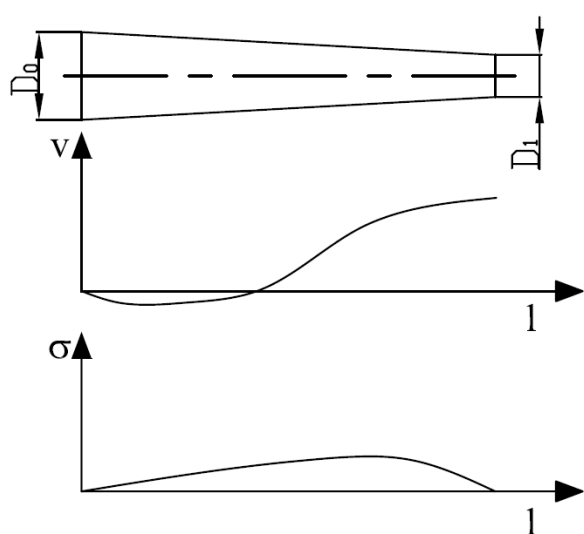
**Příloha č. 2** Jednoduchá úprava magnetostrikčního měniče [2]



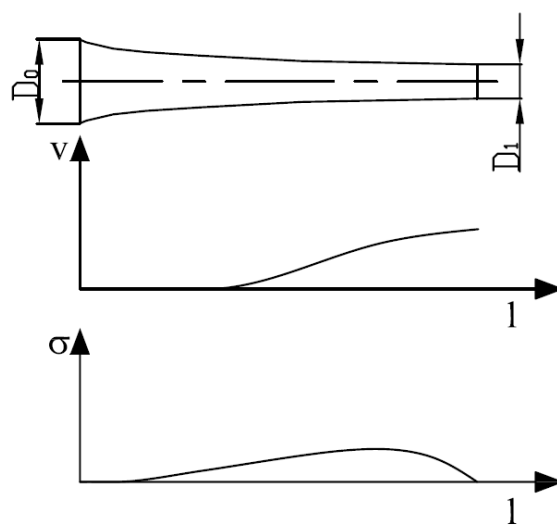
**Příloha č. 3** Další možnosti provedení magnetostrikčních měničů. Šipky naznačují směr deformace [2]



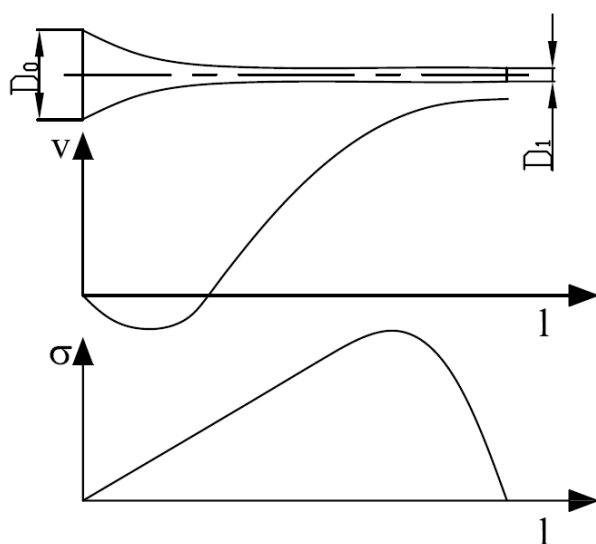
**Příloha č. 4** Další provedení akustických koncentrátorů [2]



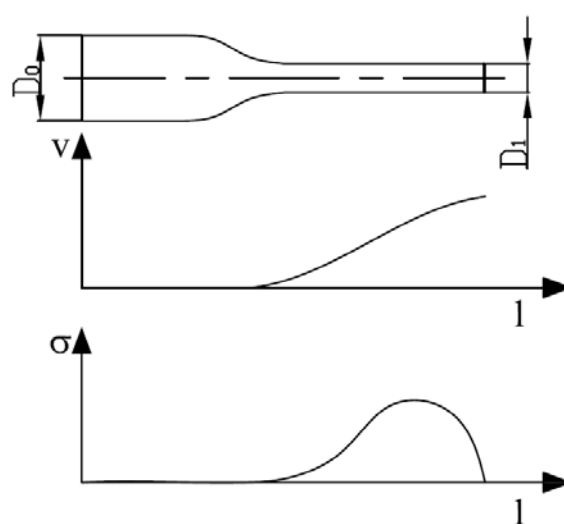
a). Kónický vlnovod



b). Exponenciální vlnovod



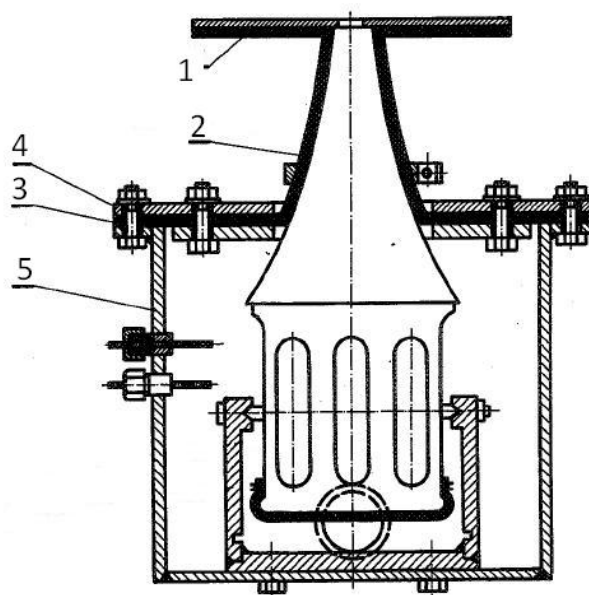
c). Katenoidální vlnovod



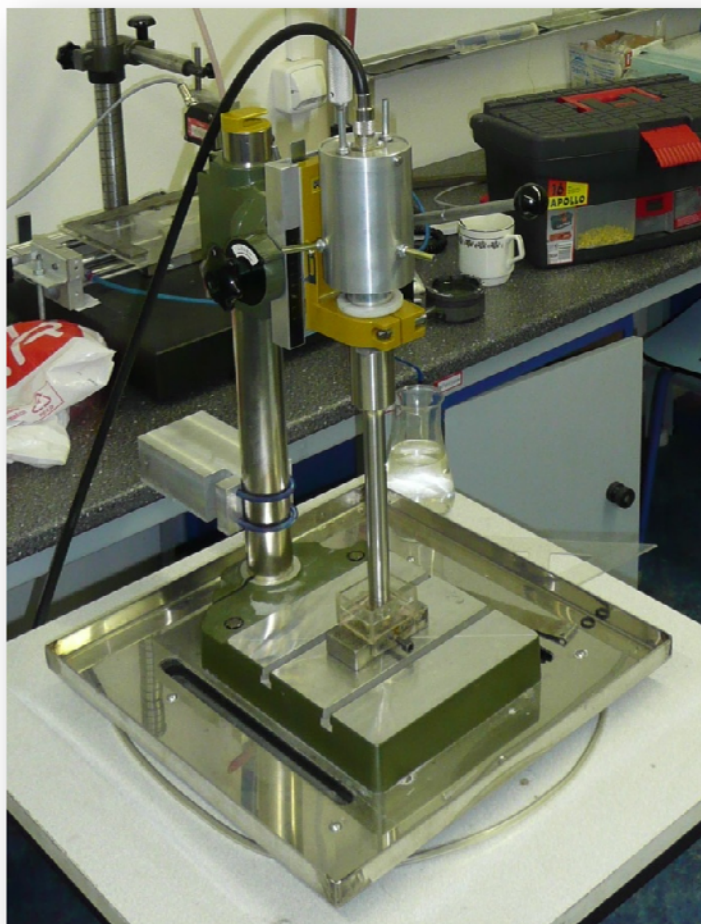
d). Fourierovský vlnovod



**Příloha č. 5** Ultrazvuková souprava, měnič s laděnou deskou [2]



**Příloha č. 6** Sestava pro generaci kavitačního pole upnuta do stojanu Proxxon BFB 2000



**Příloha č. 7** Výkonový ultrazvukový generátor UG2000/20 kHz



**Příloha č. 8** Podsestava elektrostrikční měnič a akustický koncentrátor



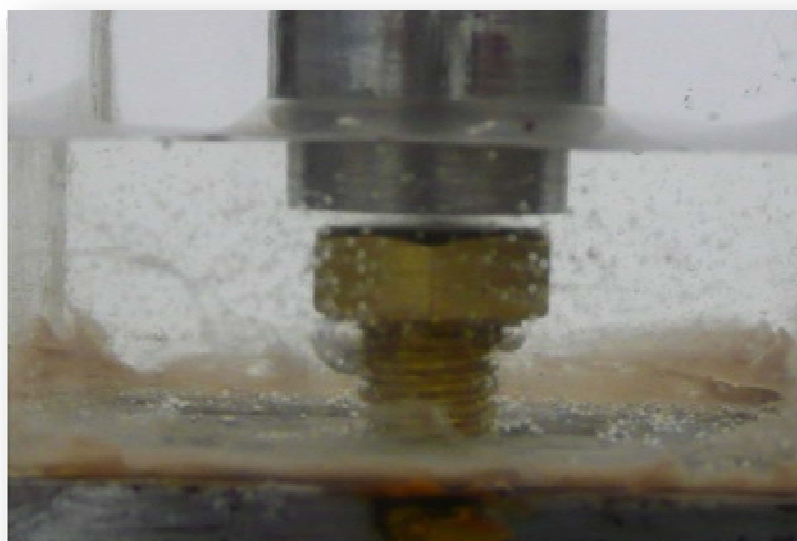
**Příloha č. 9** Aparatura se zapojeným vibrometrem OMETRON VH – 1000 D



**Příloha č. 10** Aparatura pro analýzu vzorků pomocí digitálního mikroskopu Dino – Lite AM413MZTL



**Příloha č. 11** Kavitační pole působící na vzorek





**Příloha č. 12** Přístroj na měření mikrotvrdosti Micromet 2100 Series



**Příloha č. 13** Vzorky a dopad na jejich povrch po působení kavitačního pole, seřazené podle doby působení z leva doprava 10 minut; 20 minut; 30 minut.      a) Ocel      b) Mosaz

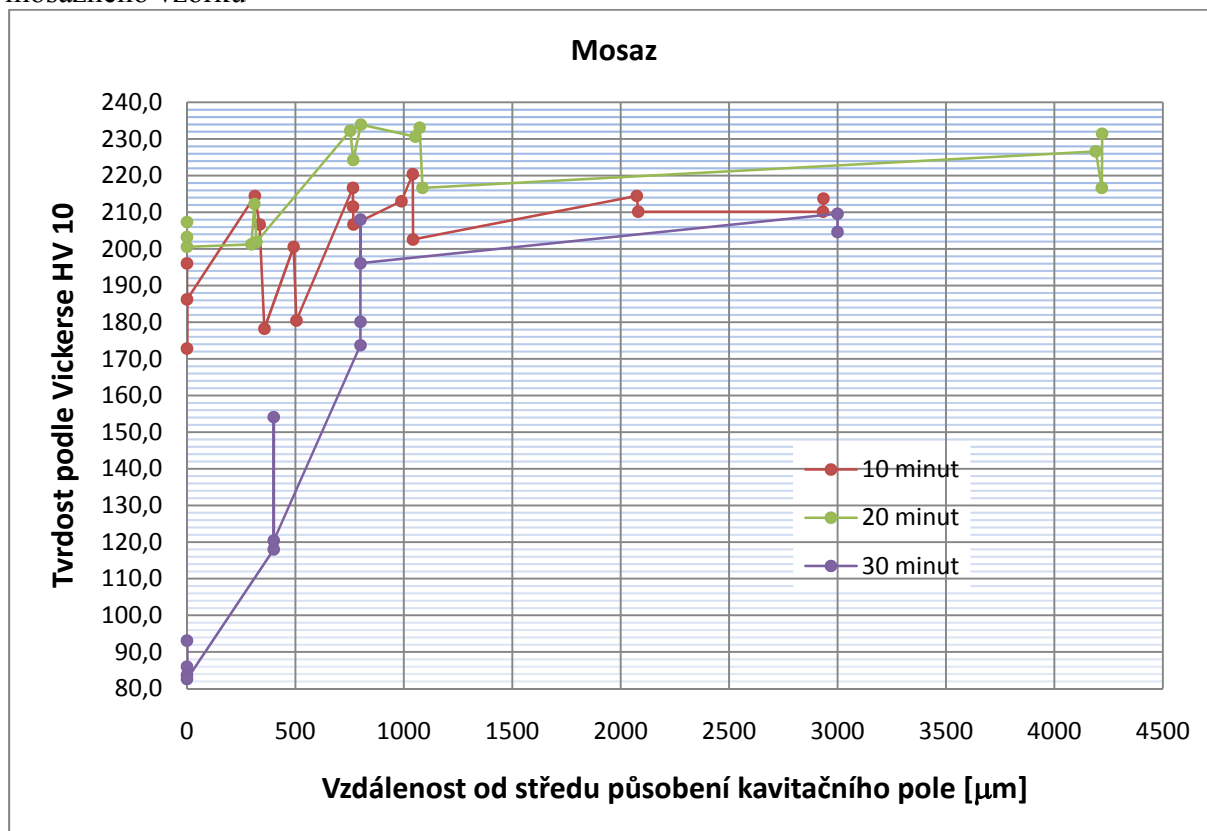
a)



b)



**Příloha č. 14** a) Graf mikrotvrdosti ocele podle Vickerse pro všechny tři měřené časy mosazného vzorku



b) Tabulky tvrdosti podle vzdálenosti od středu působení kavitačního pole pro mosazný vzorek

30min	Oblast [μm]	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]	HV 0,1
1	0	46,0	48,1	47,1	83,7
2	0	50,5	42,4	46,5	86,0
3	0	46,6	42,7	44,7	93,1
4	0	50,6	44,1	47,4	82,6
5	400	39,5	39,8	39,7	118,0
6	400	32,3	37,0	34,7	154,1
7	400	39,7	38,8	39,3	120,4
8	800	34,7	30,6	32,7	173,7
9	800	32,5	31,7	32,1	180,1
10	800	30,2	29,5	29,9	208,0
11	800	30,4	31,1	30,8	196,1
12	3000	30,6	28,9	29,8	209,6
13	3000	30,1	29,4	29,8	209,6
14	3000	29,4	30,8	30,1	204,6

20 min	Oblast [μm]	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]	HV 0,1
1	0	28,4	31,4	29,9	207,3
2	0	29,9	30,5	30,2	203,2
3	0	30,3	30,5	30,4	200,6
4	297,0	30,0	30,7	30,4	201,2
5	311,0	29,8	29,3	29,6	212,3
6	320,6	31,2	29,4	30,3	201,9
7	752,9	28,8	27,7	28,3	232,3
8	766,5	28,8	28,7	28,8	224,3
9	801,8	28,7	27,6	28,2	233,9
10	1052,9	27,3	29,4	28,4	230,6
11	1072,9	28,5	27,9	28,2	233,1
12	1085,9	27,5	31,0	29,3	216,7
13	4190,6	28,6	28,6	28,6	226,6
14	4218,8	28,6	29,9	29,3	216,7
15	4220,3	28,0	28,6	28,3	231,4

10 min	Oblast [μm]	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]	HV 0,1
1	0	28,9	32,6	30,8	196,0
2	0	31,6	33,9	32,8	172,8
3	0	31,8	31,3	31,6	186,2
4	313,0	31,5	27,3	29,4	214,5
5	335,0	31,1	28,8	30,0	206,6
6	357,0	32,8	31,7	32,3	178,2
7	491,8	28,5	32,3	30,4	200,6
8	504,6	33,4	30,7	32,1	180,5
9	765,2	30,7	27,8	29,3	216,7
10	765,6	31,2	28,0	29,6	211,6
11	767,8	29,8	30,1	30,0	206,6
12	988,8	30,6	28,4	29,5	213,0
13	1041,0	30,0	28,0	29,0	220,4
14	1042,2	31,2	29,3	30,3	202,6
15	2074,1	29,8	29,0	29,4	214,5
16	2081,0	28,8	30,6	29,7	210,1
17	2932,8	29,6	29,8	29,7	210,1
18	2935,1	29,4	29,5	29,5	213,7

c) Tabulky tvrdosti podle vzdálenosti od středu působení kavitačního pole pro ocelový vzorek

20min	Oblast[μm]	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]	HV 0,1
1	2,1	30	31,1	30,5	198,9
2	17	30,2	30,3	30,2	202,9
3	41,2	29,4	30,1	29,8	209,3
4	319	27,9	29,2	28,5	227,9
5	342,2	28	28	28	237,0
6	355,8	30,2	28,9	29,5	212,6
7	438,6	27,2	30	28,6	226,0
8	495,8	26,9	28,4	27,7	242,2
9	526	26,7	27,6	27,1	251,7
10	785,3	27,2	26	26,6	261,4
11	786,4	26,9	27,4	27,2	251,3
12	815,6	27,6	26,2	26,9	255,8
13	837,2	26,7	26,7	26,7	260,8
14	2008	27,3	26,7	27	254,3
15	2023	26,9	26,5	26,7	259,7
16	2030,1	27,7	27,7	27,7	241,4
17	2052,2	27,3	27,4	27,3	247,9
18	2058,8	26,2	27,2	26,7	259,7
19	2539,3	25,9	24,7	25,3	289,3
20	3071,8	25,1	25,3	25,2	292,7
21	4081,8	25	25,3	25,1	294,0
22	4153,8	24,8	24,9	24,9	299,1
23	4169,8	24,3	25,1	24,7	304,5

10min	Dist[μm]	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]	HV 0,1
1	0	31,2	33,4	32,3	177,30
2	0	31,2	34,6	32,9	171,00
3	0	31	30,4	30,7	196,70
4	0	33,1	26,9	30	206,20
5	343,8	29,2	29,4	29,3	216,20
6	344,2	28,8	31,2	30	205,50
7	372,2	29,1	28,6	28,8	223,40
8	534,2	28,6	28,7	28,6	226,00
9	534,4	32,2	27,4	29,8	208,80
10	854,3	29,2	29,5	29,4	214,80
11	855	29,1	27,9	28,5	228,20
12	888,4	27,3	28,3	27,8	239,70
13	1029,8	29,2	28,6	28,9	222,00
14	1055,4	29,3	27	28,1	234,20
15	1095,3	28,5	27,4	28	237,10
16	1975,2	28,5	27,4	27,9	237,80
17	1975,4	27,5	26,7	27,1	252,80
18	2026,6	27,9	27,7	27,8	240,00
19	3907,8	26,5	25,6	26	273,40
20	3909,6	25,4	26,8	26,1	272,20
21	3909,8	27	26,1	26,6	262,90